

Par'd PCT/EP70 11 MAR 2005  
PCT/NL 03 / 00634

KONINKRIJK DER



NEDERLANDEN



Bureau voor de Industriële Eigendom



Hierbij wordt verklaard, dat in Nederland op 13 september 2002 onder nummer 1021457,  
ten name van:

**NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR TOEGEPEAST-  
NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK TNO**  
te Delft

een aanvraag om octrooi werd ingediend voor:

"Werkwijze voor het meten van contourvariaties",

en dat de hieraan gehechte stukken overeenstemmen met de oorspronkelijk ingediende stukken.

Rijswijk, 29 september 2003

De Directeur van het Bureau voor de Industriële Eigendom,  
voor deze,

A handwritten signature in cursive script.

Mw. I.W. Scheevelenbos-de Reus

**PRIORITY  
DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

1021457

R. v.d. I.E.

13 SEP. 2002

## UITTREKSEL

Werkwijze voor het meten van een contourvariatie van een meetgebied op een object. De werkwijze omvat de stappen van het aanstralen van het meetgebied met een lichtbundel, waarbij reflectie of transmissie optreedt van de bundel; het splitsen van de doorgelaten of gereflecteerde bundel; het combineren van de gesplitste bundels met elkaar en het waarnemen van een interferentiepatroon dat een verschilfase weergeeft tussen de gesplitste bundels; het zodanig ten opzichte van elkaar variëren van de fase van de gesplitste bundels dat de verschilfase wordt gehouden binnen het bereik van  $2\pi$ ; het uit de verschilfase berekenen van een optisch weglengteverschil; en het relateren van het optische weglengteverschil aan de contourvariatie van het object.

1021457

B. v.d. I.E.

13 SEP. 2002

P61583NL00

**Titel:** Werkwijze voor het meten van contourvariaties.

De uitvinding heeft betrekking op een werkwijze en inrichting voor het meten van een contourvariatie van een meetgebied op een object.

Een bekende werkwijze voor het analyseren van een contour van een meetobject is het uitvoeren van interferentiemeting, waarbij het object

5 bijvoorbeeld vanuit een vlakke referentieplaat wordt aangestraald en optische weg lengteverschillen ten gevolge van contourvariaties in het object resulteren in een interferentiepatroon, waarbij de contrastlijnen in het patroon steeds faseovergangen van  $2\pi$  in het patroon weergeven. Het analyseren van dergelijke patronen is bekend en bijvoorbeeld beschreven in  
10 de Duitse octrooiaanvraag DE 198 55 455. Hoewel in trillingsvrije situaties waarbij de contourvariaties niet extreem zijn een dergelijke analysetechniek kan werken blijkt in de praktijk behoefte aan een verbeterde meettechniek om contouren te meten. Deze behoefte ontstaat met name bij bewerkingstechnieken van optische elementen zoals lenzen of spiegels,  
15 waarbij voor high-performance optica in fotolithografie, telescopie en microscopie een extreem hoge nauwkeurigheid is vereist bij het bepalen van de contouren. Dergelijke bewerkingen worden veelal toegepast voor het polijsten van oppervlakken van optische componenten, zoals refractieve optische componenten, bijvoorbeeld lenzen of vensters, uit glas, quartz of  
20 BK7, en reflectieve optische componenten, zoals spiegels, uit metaal of keramiek. Bekende werkwijsen voor het polijsten zijn naast het slijpen met een slijpmal en slijppasta en andere, veelal materiaalfnemende, technieken, zoals SPDT (single point diamond turning), CCP (computer controlled polishing), MRF (magnetorheologic finishing), FJP (fluid jet  
25 polishing) en EEM (Elastic Emission Machining), IBF (Ion Beam Figuring) en IBP (Ion Beam Polishing).

Behalve voor bovenbeschreven trillingsgevoelige opstellingen falen de bekende technieken ook in robuustheid, indien de te meten contour te sterke

84

variaties vertoont. De gemeten interferentiepatronen worden dan dermate laag in resolutie, dat metingen hieraan geen betrouwbare informatie over de contour meer produceren.

De uitvinding heeft tot doel bovengenoemde nadelen te vermijden en  
5 te voorzien in een verbeterde werkwijze voor het meten van een  
contourvariatie van een meetgebied op een object.

Dit doel wordt bereikt door een werkwijze van voornoemde type, die  
de stappen omvat van:

- het aanstralen van het meetgebied met een lichtbundel, waarbij  
10 reflectie of transmissie optreedt van de bundel;
- het splitsen van de doorgelaten of gereflecteerde bundel;
- het zodanig ten opzichte van elkaar variëren van de fase van de  
gesplitste bundels dat de verschilfase wordt gehouden binnen het bereik van  
2 pi;
- 15 het combineren van de gesplitste bundels met elkaar en het  
waarnemen van een interferentiepatroon dat een verschilfase weergeeft  
tussen de gesplitste bundels;
- het uit de verschilfase berekenen van een optisch weglengeteverschil;  
en
- 20 het relateren van het optische weglengeteverschil aan de  
contourvariatie van het object.

De werkwijze volgens de uitvinding heeft als voordeel, dat de fase-informatie die in een gereflecteerde of doorgelaten bundel is besloten,  
daaraan kan worden onttrokken zonder dat een aparte huloptiek nodig is  
25 voor het genereren van een referentiebundel ter plekke van het meetgebied.  
Dit betekent, dat door analyse van de interferentiepatronen van een  
gerecombineerde bundel, de fase-verandering van de bundel ten gevolge van  
een contourvariatie kan worden bepaald in een trillingsarmeomgeving die  
nauwelijks hinder ondervindt van storende externe factoren ten gevolge van  
30 bewerkingsstappen of andere invloeden ter plaatse van het meetgebied.

omdat deze factoren in beide bundels gelijkelijk worden meegedragen en bij fase-aftrek worden geëlimineerd. Hierdoor werken omgevingsverstoringen veel minder door op de metingen. Hierdoor kunnen eenvoudiger en kwalitatief betere metingen worden uitgevoerd.

5 De techniek maakt gebruik van de temporal phase unwrappingstechniek (TPU), zoals bijvoorbeeld is beschreven in H. van Brug, "Temporal phase unwrapping and its application in shearography systems", Appl Opt. 37(28), pp. 6701-6706, 1998. Deze techniek maakt het mogelijk het fasebeeld in de tijd opgelost te houden door incrementele

10 fasemetingen uit te voeren die steeds overeenkomen met een faseverandering die ligt binnen het bereik van  $2\pi$ , en deze in de tijd te sommeren.

In een voorkeursuitvoeringsvorm wordt de fase van de gesplitste bundels gevarieerd door het uitvoeren van een relatieve beweging van de 15 bundel en het meetgebied, zodanig, dat de vorm van het meetgebied verandert. Door een veranderende vorm van het meetgebied wijzigt het fasebeeld in de bundel. Door het detecteren van de faseverandering volgens de werkwijze van de uitvinding, kan door middel van een scannende beweging, bijvoorbeeld, door het object te fixeren en de bundel een 20 scanbeweging te laten uitvoeren en/of omgekeerd: door het fixeren van de lichtbundel en het uitvoeren van een geringe verplaatsing van het object, een faseverandering in de bundel worden bewerkstelligd die vanuit een nulpositie steeds de contourvariaties ten opzichte van die nulpositie kan registreren. Door via TPU de fase steeds opgelost in de tijd te houden kan 25 door uitvoeren van de scan de geometrie van het object worden geanalyseerd over een willekeurig groot scanoppervlak.

In aanvulling of als alternatief op bovengenoemde uitvoeringsvorm is het mogelijk een veranderende vorm in een vast meetgebied te meten, bijvoorbeeld, in het geval dat het meetgebied onder invloed van een 30 materiaal toe- of afnemende bewerking van vorm verandert. Deze

uitvoeringsvorm is met name nuttig bij bewerkingen van de eerderbeschreven soort, waarbij tijdens de bewerking een nauwkeurige monitoring van de toe- en afname bewerkingen dient plaats te vinden.

In een verdere uitvoering kan de fase worden gevarieerd door in één  
5 van de gesplitste bundels een optisch fasefilter te plaatsen voor het genereren van een voorbepaald fasevlak. Dit fasefilter kan een pin-hole zijn ter grootte van de diffractie-spot, zodat het fasevlak een nulfront is.

Uiteraard kan dit nulfront door een hologram of door andere fase-optiek worden gemodificeerd, teneinde een interferentiepatroon te verkrijgen dat  
10 een aanvaardbare resolutie heeft overeenstemmend met een bepaalde contour. Zo kan in een uitvoeringsvorm een nulfront worden gevormd met een fase-optiek, welke door middel van de interferentiepatronen exact op nul moet worden afgeregeld teneinde een gewenste, voorbepaalde contour te detecteren. De pin-hole laat een kleine fractie van de bundel door op een  
15 optische as. Hierdoor wordt een puntvormige lichtbron gesimuleerd met een vrijwel vlak fase-front. Door het fasefilter wordt derhalve een nulfase-bundel afgeleverd, die verder exact de verstoringen en weglengteverschillen in zich draagt die door de optiek worden geïntroduceerd. Deze verstoringen worden bij interferentie met de reflectie- of transmissiebundel geëlimineerd,  
20 waardoor precies een faseverstoring kan worden gedetecteerd die door optische weglengtevariaties tengevolge van een contourvariatie wordt veroorzaakt.

In een voorkeursuitvoeringsvorm bezit de bundel een zodanige diameter dat ten minste twee in hoogte variërende posities in een  
25 meetgebied worden belicht; waarbij de werkwijze de verdere stap omvat van: het verschuiven van de meetbundel ten opzichte van zichzelf langs de verbindingslijn tussen genoemde posities zodat een verschilfase tussen de verschoven bundels ligt binnen een bereik van  $2\pi$ ; en het door integratie van de verschilfase berekenen van een aan de contourvariatie van het object

gerelateerd optisch weglengteverschil. Opgemerkt wordt, dat de verschuivingstechniek op zichzelf aan de vakman als "shearing" bekend is.

In een voordeelige uitvoeringsvorm van deze shearing-toepassing omvat de werkwijze de stap van het verdraaien van een gesplitste bundel door middel van een roterende spiegel; het op een lens projecteren van de gesplitste bundels die ten gevolge van de verdraaiing ten opzichte van elkaar onder een hoek verlopen; en het waarnemen van een interferentiepatroon in een focusvlak van de lens tengevolge van een verschuiving van de bundels die overeenstemt met de hoekverdraaiing van de roterende spiegel. Door de rotatie van de spiegel gecontroleerd uit te voeren ontstaat een interferentiepatroon dat overeenkomt met een eerste orde afgeleide van de faseverschuiving. Deze eerste orde kan door het controleren van de fasehoek opgelost worden naar een fasebeeld, dat, onder verwijzing naar eerder genoemde uitvoeringen, kan worden gerelateerd aan een contourvariatie van het object. Door de afschuiving af te stemmen op een gedetecteerde stijlheid kan steeds met een maximale resolutie een incrementele fasevariatie worden gedetecteerd, zodat de methode een relatief grote gevoeligheid heeft.

Bij voorkeur is daarbij de meetbundel een evenwijdige lichtbundel van een relatief geringe diameter, waarbij het meetgebied een afmeting bezit die geringer is dan de diameter van de meetbundel.

In een alternatieve uitvoering kan de gereflecteerde meetbundel een diffuse lichtbundel zijn. In één variant kan de meetbundel een homogene, evenwijdige lichtbundel zijn, waarbij het meetoppervlak is voorzien van een matlaag, zodanig, dat de gereflecteerde bundel een diffuse lichtbundel is. In een andere variant kan de meetbundel worden gereflecteerd aan een glad oppervlak, waarbij de meetbundel een diffuse lichtbundel is. Onder een diffuse bundel wordt verstaan een bundel met een nagenoeg willekeurige verdeling van richtingen binnen een voorbepaald bereik van richtingen. Een dergelijk bereik kan één centrale hoofdrichting bezitten, in het bijzonder een

richting die gericht is naar de waarnemingsoptiek. Het gebruik van dergelijke diffuse lichtbronnen is de vakman bekend als een speckletechniek. Deze techniek biedt in het kader van de uitvinding het voordeel, dat relatief grotere oppervlakken met relatief grote vormvariaties kunnen worden geanalyseerd. In het bijzonder wordt door het incrementeel meten van de fase een beeld verkregen, waarin de willekeurige verdeling is verdwenen, omdat het faseverschilbeeld, evenals in het geval met een normale, homogene bundel, uitsluitend gerelateerd is aan de fasevariatie ten gevolge van de contourvariatie.

10 De uitvinding heeft verder betrekking op een inrichting voor het meten van een contourvariatie van een meetgebied op een object. De inrichting volgens de uitvinding omvat een lichtbron voor het verschaffen van lichtbundel voor het aanstralen van een meetgebied een houder voor het positioneren van het object ten opzichte van de lichtbron; een

15 bundelsplitsorgaan voor het splitsen van de doorgelaten of gereflecteerde bundel; een fasebeïnvloedingsorgaan, voor het instellen van een faseverschil tussen de gesplitste bundels; een bundelcombinatieorgaan voor het combineren van de gesplitste bundels; een waarnemingsorgaan voor het waarnemen van een interferentiepatroon dat een verschilfase weergeeft

20 tussen de gesplitste bundels; en een processor voor het uit de verschilfase berekenen van een optisch weglengteverschil en voor het relateren van het optische weglengteverschil aan de contourvariatie van het object.

De uitvinding zal nader worden toegelicht onder verwijzing naar de  
25 figuren.

Hierin toont:

Fig. 1 een schematisch opstelling van een meetbundel die een contourvariatie aftast;

Fig. 2 een weergave van een fasebeeld zoals uit een  
30 interferentiepatroon kan worden afgeleid;

Fig. 3 een weergave van een opgeloste fase volgens de TPU-techniek;

Fig. 4. een schematische weergave van de fasebeelden van twee lichtten ten opzichte van elkaar verschoven bundels;

Fig. 5 een schematische weergave van een gecombineerd fasebeeld  
5 zoals uit een interferentiepatroon kan worden afgeleid;

Fig. 6 een schematische weergave van het fasebeeld zonder dat de fase in de tijd is opgelost;

Fig. 7 een eerste opstelling volgens de uitvinding voor het meten van een contourvariatie; en

10 Fig. 8 een tweede opstelling volgens de uitvinding voor het meten van een contourvariatie.

In de figuren zijn gelijke delen met dezelfde verwijzingscijfers benoemd.

15 Onder verwijzing naar figuur 1 wordt nu een basisopstelling gegeven van een object, zoals bijvoorbeeld een reflectief object 1 als een optisch element, zoals een lens, dat een bepaalde contour 2 bezit die met behulp van een aftastbundel 3 wordt gemeten. De aftastbundel 3 is bij voorkeur een coherente lichtbundel, die voor reflectie aan het object 1 een vast fasefront 4 heeft, dat gemakshalve vlak wordt verondersteld. Overigens zal blijken dat in bepaalde gevallen als zal worden beschreven onder verwijzing naar figuur 7 ook voor een niet vlak fasefront de contour van het oppervlak kan worden herleid uit het fasebeeld van de bundel. In figuur 1 is met een eerste lichtstraal 5 een lichtweg weergegeven van een straal, die reflecteert aan een op een eerste hoogte gelegen punt van het object. Deze hoogte is in de figuur weergegeven met de nulhoogte in een door vetgestreepte lijnen aangeduid assenstelsel 6. Verder is met een tweede lichtstraal 7 een lichtweg weergegeven van een straal, die reflecteert aan een op een tweede hoogte gelegen punt van het object, op afstand d ten opzichte van het eerste punt. Tenslotte is, voor de volledigheid, een derde lichtweg 8 weergegeven van

een straal, die wederom reflecteert aan een op de nulhoogte gelegen positie. Uit figuur 1 is duidelijk, dat de verschillende lichtstralen die in bundel 3 een oppervlak 2 bestralen, door de contourvariatie van het object 3 een fasevariatie in de bundel bewerkstelligen, die gerelateerd is aan die  
5 contourvariatie door de formule

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2d \cos\alpha \quad (1)$$

Waarbij  $\Delta\phi$  de fasevariatie ten opzichte van de nulfase is (gerepresenteerd door de gearceerde lijn 9);  $\lambda$  de gehanteerde lichtgolfelengte;  $\alpha$  de hoek waaronder ten opzichte van een normaallijn wordt gemeten en  $d$   
10 de contourvariatie representeert.

Onder verwijzing naar figuur 2 kan nu worden ingezien, hoe een soortgelijk fasepatroon 10 (in dit geval van een symmetrische verstoring) wordt waargenomen, indien de gereflecteerde bundel wordt gecombineerd met een nulfasebundel. (Deze interferentie zal nader onder verwijzing naar  
15 figuur 7 worden besproken). Omdat faseverschuivingen uit hun aard slechts modulo  $2\pi$  kunnen worden waargenomen, ontstaat, zonder gebruikmaking van de TPU techniek een fasebeeld dat een groot aantal discontinuïteiten heeft op de  $2\pi$ -overgangen. Het moge duidelijk zijn dat zulke overgangen in praktijkmeetresultaten zeer moeilijk zijn te identificeren waardoor het  
20 "ontvouwen" van een gemeten fasediagram 10 in een "werkelijk" fasebeeld dat overeenstemt met een fasevariatie tengevolge van een contourvariatie, bijvoorbeeld, zoals onder verwijzing naar 9 in figuur 1 weergegeven, sterk afhankelijk is van ruis in het gemeten beeld en het aantal fasesprongen.

Figuur 3 geeft weer hoe een dergelijk fasebeeld in "ontvouwen  
25 toestand" kan worden bepaald door de TPU techniek. Essentieel komt deze techniek neer op het beperken van locaal of temporeel gemeten fasevariaties binnen een bereik van  $2\pi$ , zodat effectief geen fasesprongen kunnen optreden. Dit kan worden bereikt door de veranderingen in het oppervlak tussen twee metingen klein genoeg te laten zijn, ofwel doordat de metingen

elkaar snel opvolgen, doordat de afname traag genoeg verloopt of doordat de aangebrachte verandering in het meetsysteem klein genoeg is.

Hierdoor kan, door het vastleggen van een locale of temporele fasevariatie ten opzichte van een nulfase, een uitgangspunt worden gekozen voor het meten van een volgende fase. Een fasebeeld 11 blijft zo in de tijd en plaats opgelost, zonder dat fasesprongen in de metingen voorkomen. In de figuur komt dit neer op het scannen van de contour in de richting van de pijl verlopend langs het fasevlak, waarbij steeds een fasevariatie wordt bepaald die ligt binnen het bereik van  $2\pi$ . De gedetecteerde fasevariatie wordt gekozen als uitgangspunt voor het doen van een volgende bepaling. De fase-toename wordt voor iedere positie in de tijd gesommeerd, waardoor het totaal van de fasevariatie inherent opgelost blijft.

Een uitvoeringsvorm voor het berekenen van de faseveranderingen kan zijn om op elk moment fasegestapte beelden op te nemen voor het berekenen van de fase, gevolgd door het aftrekken van de fase-distributie voor twee opvolgende opnames. Voor het oplossen van de fase dienen daarvoor minimaal drie fasegestapte beelden per keer te worden gebruikt; aangezien drie onbekenden grootheden de fasegestapte beelden bepalen: de achtergrondintensiteit, de modulatie-intensiteit en de fase.

Een andere benadering kan zijn het samenvoegen van onderling gesplitste bundels, waarbij een tweede lichtbundel ten opzichte van een eerste bundel met een kwart golflengte is vertraagd. De hierdoor verkregen beelden kunnen na bijvoorbeeld softwarematige spiegeling direct van elkaar worden afgetrokken om de verandering van het faseverschil tussen de interfererende bundels van opeenvolgende metingen te bepalen.

Voor deze benadering is een minimum aan vier fasegestapte beelden noodzakelijk:

Voor elke tijd  $t$  worden zo de fasegestapte beelden opgenomen:

$$I_o(t) = I_B + I_M \cos(\phi(t)) \quad (2)$$

$$I_{\pi/2}(t) = I_B - I_M \sin(\phi(t)) \quad (3)$$

Hierbij zijn  $I_B$  en  $I_M$  respectievelijk de achtergronds- en de modulatie-intensiteit. De grootheid  $\phi(t)$  geeft het faseverschil aan tussen het object en een referentiefase. De faseverandering kan tussen twee opvolgende

5 opnames  $t$  en  $t + T$  worden verkregen door

$$\Delta\phi(t+T, t) = -\frac{\pi}{2} - 2 \arctan \left( \frac{I_0(t) - I_{\pi/2}(t+T)}{I_{\pi/2}(t) - I_0(t+T)} \right) \quad (4)$$

waarbij het subscript 0 en  $\pi/2$  de fasestap aangeeft tussen twee interfererende bundels. De geregistreerde faseveranderingen kunnen worden opgeteld via

$$10 \quad \Delta\Phi = \sum_i \Delta\phi(\{i+1\}T, iT)$$

Merk op dat de in figuur 3 weergegeven fase een bereik heeft van 20, derhalve nagenoeg  $7\pi$ . Het moge duidelijk zijn dat dit fasebeeld niet rechtstreeks kan worden waargenomen maar alleen door middel van oplossing bijvoorbeeld door TPU kan worden berekend.

15 In figuur 4 is een denkbeeldige weergave getoond van het fasepatroon van een licht ten opzichte van zichzelf verschoven meetbundel, bijvoorbeeld met een door een contourvariatie 11 zoals weergegeven in figuur 3, weergegeven door een doorgetrokken lijn 12 en een onderbroken lijn 13. Deze techniek is de vakman wel bekend als shearing of afschuiving. De  
20 bundel wordt nu niet, zoals nader onder verwijzing van figuur 8 wordt toegelicht, met een nulfasebundel gecombineerd, waardoor een contour als bijvoorbeeld de contour 11 in figuur 3 kan worden verkregen, maar met een verschoven versie van de reflectiebundel. Bij combinatie van deze bundels wordt op een detectievlak van bijvoorbeeld een camera een  
25 interferentiepatroon waargenomen dat de verschilfase tussen de bundels weergeeft, gelijk het geval is bij interferentie met een nulfasebundel als beschreven onder verwijzing naar figuur 3. De verschilfase kan worden

uitgedrukt als de mathematische afgeleide van de fasecontour. Deze verschilfase kan, door het zodanig verschuiven van de fase, dat de verschilfase wordt gehouden binnen een bereik van  $2\pi$  door middel van TPU worden opgelost, hetgeen resulteert in een fasecontour 14 zoals

- 5 weergegeven onder verwijzing naar figuur 5. Inderdaad geeft het positieve linker deel van de fasecontour van figuur 5 het deel weer, waar de doorgetrokken lijn 12 van figuur 4 boven de onderbroken lijn 13 van de verschoven bundel verloopt; het negatieve deel geeft het rechter deel, daar waar de doorgetrokken lijn 12 onder de onderstreepte lijn 13 verloopt. De 10 door middel van TPU verkregen fase dient, voor het verkrijgen van de echte fasecontour, zoals die verloopt als de doorgetrokken lijn 12 of onderstreepte lijn 13 van figuur 4, in de richting van de afschuiving te worden geïntegreerd. Indien de vinding wordt toegepast bij een materiaaltoenemende of -afnemende bewerking, d.w.z. in het geval dat een 15 contour lokaal varieert, is het voordelig de integratie te starten vanuit een zone waarin geen veranderingen zijn opgetreden; deze zone dient dan als referentiezone en contourvariaties kunnen eenduidig op een dergelijke vaste referentie worden bepaald. Indien een dergelijke referentiezone niet beschikbaar is, kan alleen lokaal de variatie worden geïdentificeerd en is de 20 contour op een constante na bepaald. De mate van afschuiving wordt bepaald door de stijlheid van de contourvariatie: indien een grote stijlheid wordt gedetecteerd dient de afschuiving relatief gering te zijn voor het eenduidig oplossen van de fase; omgekeerd; indien een relatief geringe stijlheid wordt gedetecteerd kan de afschuiving aanzienlijk zijn. Door de 25 afschuiving af te stemmen op een gedetecteerde stijlheid kan steeds met een maximale resolutie een incrementele fasevariatie worden gedetecteerd, zodat de methode een relatief grote gevoeligheid heeft.

- Figuur 6 tenslotte toont een verschilfasebeeld 15 aan, zoals dat wordt gemeten zonder de fase in de tijd opgelost te houden, d.w.z. indien 30 faseveranderingen groter dan  $2\pi$  optreden. Het is duidelijk, vooral voor

praktische opstellingen die geplaagd worden door inherente systeem-onnauwkeurigheden en ruis, dat dergelijke metingen zeer moeilijk herleidbaar zijn tot een fasediagram zoals weergegeven in figuur 4.

Figuur 7 toont een eerste opstelling van een inrichting volgens de uitvinding, waarbij gebruik wordt gemaakt van inrichting voor het meten van een contourvariatie van een meetgebied op een object. De inrichting van figuur 7 omvat een niet weergegeven lichtbron die een meetgebied aanstraalt, waarbij vanuit een positie 18 een reflectiebundel 19 wordt gegenereerd. Het meetgebied is schematisch weergegeven en is een onderdeel van een contour van een object, die door een niet weergegevenhouder ten opzichte van de lichtbron en de meetoptiek 16 wordt gepositioneerd. De meetoptiek omvat een onder een hoek opgestelde, halfdoorlatende spiegel 20, voor het splitsen van de gereflecteerde bundel 19. De spiegel 20 genereert derhalve twee loodrecht op elkaar staande, onderling gesplitste bundels 21 en 22. De bundels 21 en 22 doorlopen een aparte optische weg door de meetoptiek 16, alvorens ze in een tweede halfdoorlatende spiegel 23 worden gecombineerd. Door een roteerbare spiegel 24 is de onderlinge hoek van bundel 22 ten opzichte van de spiegel 23 instelbaar. Hierdoor wordt bundel 22 onder een ten gevolge van de rotatie verdraaide hoek op spiegel 23 geprojecteerd. De halfdoorlatende spiegel 23 projecteert de bundel in twee takken 25, elk voorzien van een lens 26 en een camera 27. De takken worden door middel van niet weergegeven fase-organen ten opzichte van elkaar vertraagd, zodat, zoals boven onder verwijzing naar vergelijkingen 2)-3) is uiteengezet, twee fasegestapte beelden worden waargenomen die  $90^\circ$  ten opzichte van elkaar in fase zijn gedraaid. De camera's 27 zijn beide verbonden met een niet weergegeven processor, die door aftrek van beide beelden direct een fase-increment kan bepalen volgens vergelijking 4. Doordat bundel 22 ten gevolge van de verdraaiing onder een hoek op de lenzen 26 wordt geprojecteerd neemt een in het focusvlak van de lens 26 opgestelde camera 27 een

interferentiepatroon waar tengevolge van een verschuiving van de bundels 21, 22, die overeenstemt met de hoekverdraaiing van de roterende spiegel. De processor berekent vervolgens uit vergelijking 1 een optisch weg lengteverschil en voor het relateren van het optische weg lengteverschil 5 aan de contourvariatie van het object.

Figuur 8 toont een tweede opstelling volgens de uitvinding, waarbij eveneens gebruik wordt gemaakt van een inrichting voor het meten van een contourvariatie van een meetgebied op een object. De inrichting 28 van figuur 8 omvat evenals in figuur 7 een niet weergegeven lichtbron die een 10 meetgebied 17 aanstraalt en waarbij een reflectiebundel 19 wordt gegenereerd.

De meetoptiek 28 omvat evenals de opstelling van figuur 7 een onder een hoek opgestelde, halfdoorlatende spiegel 20, voor het splitsen van de 15 gereflecteerde bundel 19. De spiegel 20 genereert derhalve twee loodrecht op elkaar staande, onderling gesplitste bundels 21 en 22. De bundels 21 en 22 doorlopen een aparte optische weg door de meetoptiek 28, alvorens ze in een tweede halfdoorlatende spiegel 23 worden gecombineerd. De in figuur 7 20 roterbare spiegel 24 is nu echter vervangen door een vaste spiegel 29, die de gesplitste bundel 22 evenwijdig aan de doorgaande bundel 21 doet verlopen. De gesplitste bundel wordt rechtstreeks geprojecteerd op halfdoorlatende spiegel 23, die de bundel in twee takken 25 projecteert, 25 eveneens elk voorzien van een lens 26 en een camera 27. De takken zijn verder vormgegeven als onder verwijzing naar figuur 7 is uiteengezet. In plaats van, zoals bij figuur 7 het geval was, de bundel te combineren met een verschoven versie van zichzelf, is nu in een van de gesplitste bundels 21 een optisch fase-filter opgesteld. Dit fasefilter omvat een tussen twee lenzen 30 opgestelde pin-hole 31 die slechts een kleine fractie van de bundel doorlaat. Hierdoor wordt een puntvormige lichtbron gesimuleerd met een vrijwel vlak fase-front. Door het fasefilter wordt derhalve een nulfase- 30 bundel afgeleverd, die verder exact de verstoringen en weg lengteverschillen

in zich draagt die door de optiek in de gesplitste versie worden geïntroduceerd. Ter vergroting van de symmetrie kan in de gesplitste bundel 22 eveneens een identiek lenzenstelsel 30 zijn opgesteld. Door combinatie van de nulfasebundel 21' en de gesplitste bundel 22 ontstaat 5 een interferentiebeeld waaruit, zoals onder verwijzing naar figuur 2 en 3 is uiteengezet, een fasevariatie kan worden afgeleid die gerelateerd kan worden aan de contourvariatie van het meetgebied 17.

Hoewel de uitvinding is besproken aan de hand van de in de tekening weergegeven uitvoeringsvoorbeelden is deze daartoe niet beperkt maar kan 10 allerlei variaties en modificaties daarop bevatten. Zo is het goed mogelijk, om, in tegenstelling tot de beschreven uitvoeringsvoorbeelden, bij optisch transmissieve objecten een transmissiebundel te analyseren. Dit kan zelfs een voordeel zijn, indien de bovenzijde van het object moeilijk bereikbaar is, bijvoorbeeld, doordat een materiaal toe- of afnemende bewerking wordt 15 uitgevoerd. Verder kan de fasevariatie worden geanalyseerd met behulp van diffuse lichtbundels, omdat de techniek slechts gebruik maakt van een verschilfasemeting. De werkelijke fase mag derhalve een "wild" en moeilijk analyseerbaar beeld opleveren, zolang de verschilbeelden maar een voldoende resolutie bezitten. Door het gebruik maken van diffuse 20 lichtbundels, bijvoorbeeld, door het bestralen van een te analyseren object met een diffuse bundel of door het bestralen daarvan met een relatief coherente bundel, maar waarbij het object is voorzien van een matlaag, kan onder een relatief geringe waarnemingshoek een fasebeeld, en bijbehorende fasevariatie worden waargenomen, die informatie in zich draagt over een 25 relatief groot oppervlak met relatief grote contourvariaties. Deze diffuse-bundeltechnieken of speckle-technieken blijken daarom zeer gunstig voor de analyse van relatief grote meetgebieden met relatief grote contourvariaties.

Dergelijke variaties worden geacht te liggen in het bereik van de uitvinding, zoals gedefinieerd door de navolgende conclusies.

## CONCLUSIES

1. Werkwijze voor het meten van een contourvariatie van een meetgebied op een object, omvattende de stappen van:
  - het aanstralen van het meetgebied met een lichtbundel, waarbij reflectie of transmissie optreedt van de bundel;
  - het splitsen van de doorgelaten of gereflecteerde bundel;
  - het zodanig ten opzichte van elkaar variëren van de fase van de gesplitste bundels dat de verschilfase wordt gehouden binnen het bereik van  $2\pi$ ;
  - het combineren van de gesplitste bundels met elkaar en het waarnemen van een interferentiepatroon dat een verschilfase weergeeft tussen de gesplitste bundels;
  - het uit de verschilfase berekenen van een optisch weglengeteverschil; en
  - het relateren van het optische weglengeteverschil aan de contourvariatie van het object.
2. Werkwijze volgens conclusie 1, met het kenmerk, dat de fase van de gesplitste bundels wordt gevarieerd door het uitvoeren van een relatieve beweging van de bundel en het meetgebied, zodanig, dat de vorm van het meetgebied verandert.
- 20 3. Werkwijze volgens conclusie 1 of 2, met het kenmerk, dat het meetgebied onder invloed van een materiaal toe- of afnemende bewerking van vorm verandert.

4. Werkwijze volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met het kenmerk, dat de werkwijze herhaald wordt toegepast voor het meten van faseveranderingen groter dan  $2\pi$ .
5. Werkwijze volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met het kenmerk, dat de fase wordt gevarieerd door in één van de gesplitste bundels een optisch fasefilter te plaatsen voor het genereren van een voorbepaald fasevlak.
6. Werkwijze volgens conclusie 5, met het kenmerk, dat het fasefilter een pin-hole is ter grootte van de diffractie-spot, zodat het fasevlak een nulfront is.
7. Werkwijze volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met het kenmerk, dat de bundel een zodanige diameter bezit dat ten minste twee in hoogte variërende posities in een meetgebied worden belicht; welke werkwijze de stap omvat van:
  - 15 – het verschuiven van de meetbundel ten opzichte van zichzelf langs de verbindingslijn tussen genoemde posities zodat een verschilfase tussen de verschoven bundels ligt binnen een bereik van  $2\pi$ ; en
  - het door integratie van de verschilfase berekenen van een aan de contourvariatie van het object gerelateerd optisch weg lengteverschil.
- 20 8. Werkwijze volgens conclusies 7, met het kenmerk, de werkwijze de stap omvat van het verdraaien van een gesplitste bundel door middel van een roterende spiegel; het op een lens projecteren van de gesplitste bundels die ten gevolge van de verdraaiing ten opzichte van elkaar onder een hoek verlopen; en het waarnemen van een interferentiepatroon in een focusvlak
- 25 van de lens tengevolge van een verschuiving van de bundels die overeenstemt met de hoekverdraaiing van de roterende spiegel.

9. Werkwijze volgens conclusie 8, met het kenmerk, dat mate van afschuiving wordt bepaald door de stijlheid van de contourvariatie.
10. Werkwijze volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met het kenmerk, dat de meetbundel een evenwijdige lichtbundel is van een relatief geringe diameter, waarbij het meetgebied een afmeting bezit die geringer is dan de diameter van de meetbundel.
11. Werkwijze volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met het kenmerk, dat de gereflecteerde meetbundel een diffuse lichtbundel is.
12. Werkwijze volgens conclusie 11, met het kenmerk, dat de meetbundel een homogene, evenwijdige lichtbundel is, waarbij het meetoppervlak is voorzien van een matlaag, zodanig, dat de gereflecteerde bundel een diffuse lichtbundel is.
13. Werkwijze volgens conclusie 11, met het kenmerk, dat de meetbundel wordt gereflecteerd aan een glad oppervlak, waarbij de meetbundel een diffuse lichtbundel is.
14. Inrichting voor het meten van een contourvariatie van een meetgebied op een object, omvattende:
  - een lichtbron voor het verschaffen van lichtbundel voor het aanstralen van een meetgebied
  - 20 — een houder voor het positioneren van het object ten opzichte van de lichtbron;
  - een bundelsplitsorgaan voor het splitsen van de doorgelaten of gereflecteerde bundel;
  - een fasebeïnvloedingsorgaan, voor het instellen van een faseverschil tussen de gesplitste bundels;
  - 25 — een bundelcombinatieorgaan voor het combineren van de gesplitste bundels;

— een waarnemingsorgaan voor het waarnemen van een interferentiepatroon dat een verschilfase weergeeft tussen de gesplitste bundels; en

— een processor voor het uit de verschilfase berekenen van een optisch weglengetevschil en voor het relateren van het optische weglengetevschil aan de contourvariatie van het object.

15. Inrichting volgens conclusie 14, met kenmerk, dat de houder is ingericht voor het uitvoeren van een relatieve beweging van de bundel en het object.

10 16. Inrichting volgens conclusie 14 of 15, met het kenmerk, dat de inrichting is voorzien van middelen voor het veranderen van de vorm van het object door een materiaal toe- of afnemende bewerking.

17. Inrichting volgens ten minste één van de conclusies 13-16, waarbij het fasebeïnvloedingsorgaan een optisch fasefilter omvat voor het genereren 15 van een voorbepaald fasevlak.

18. Inrichting volgens conclusie 17, met het kenmerk, dat het fasefilter een pin-hole is, zodat het fasevlak een nulfront is.

19. Inrichting volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met 20 het kenmerk, dat de bundel een zodanige diameter bezit dat ten minste twee in hoogte variërende posities in een meetgebied worden belicht; waarbij het fasebeïnvloedingsorgaan middelen omvat voor het op instelbare wijze verschuiven van de meetbundel ten opzichte van zichzelf langs de verbindinglijn tussen genoemde posities.

20. Inrichting volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met 25 het kenmerk, dat het fasebeïnvloedorgaan een roterende spiegel omvat voor het onder een hoek verdraaien van de gesplitste bundel, waarbij het

bundelcombinatieorgaan de gesplitste bundels combineert en onderling onder een hoek verlopend op een lens projecteert, waarbij het waarnemingsorgaan is opgesteld in een focusvlak van de lens, zodat een interferentiepatroon wordt waargenomen tengevolge van een verschuiving  
5 van de bundels die overeenstemt met de hoekverdraaiing van de roterende spiegel.

21. Inrichting volgens tenminste één van de voorgaande conclusies, met het kenmerk, dat de meetbundel een evenwijdige lichtbundel is van een relatief geringe diameter, waarbij het meetgebied een afmeting bezit die

10 geringer is dan de diameter van de meetbundel.

22. Inrichting volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met het kenmerk, dat de gereflecteerde meetbundel een diffuse lichtbundel is.

23. Inrichting volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met het kenmerk, dat de meetbundel een homogene, evenwijdige lichtbundel is,  
15 waarbij het meetoppervlak is voorzien van een matlaag, zodanig, dat de gereflecteerde bundel een diffuse lichtbundel is.

24. Inrichting volgens ten minste één van de voorgaande conclusies, met het kenmerk, dat de meetbundel wordt gereflecteerd aan een glad oppervlak, waarbij de meetbundel een diffuse lichtbundel is.

Fig 1

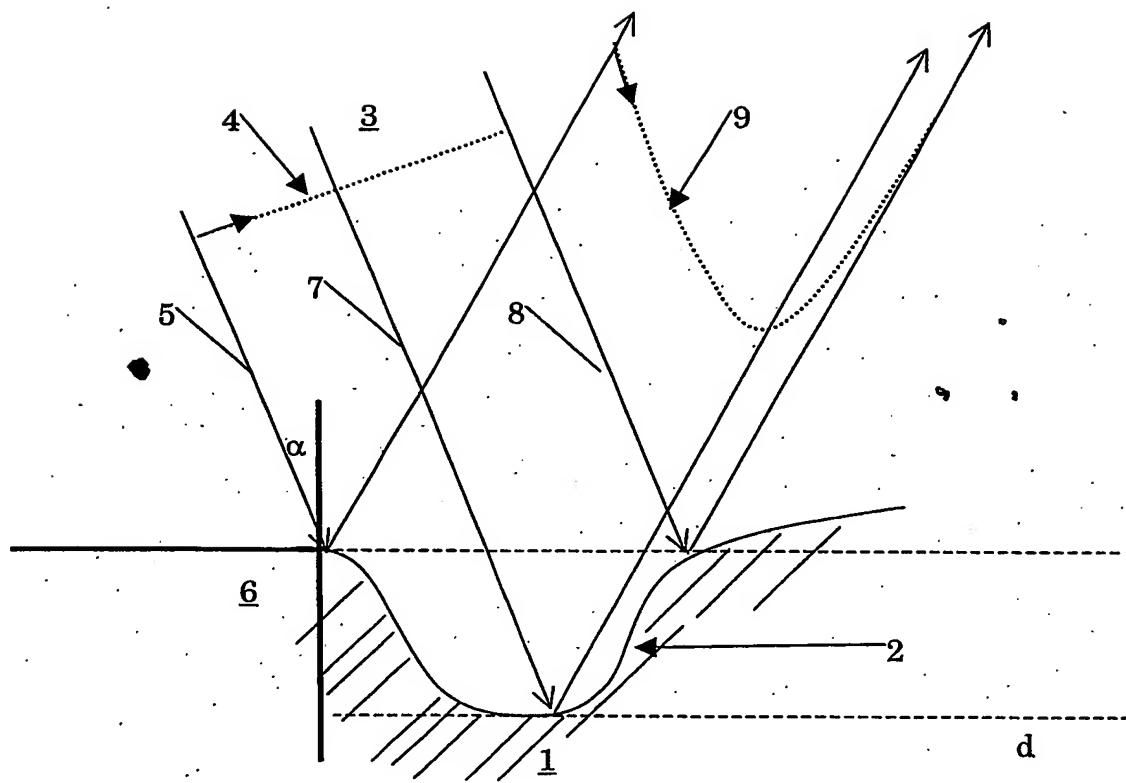
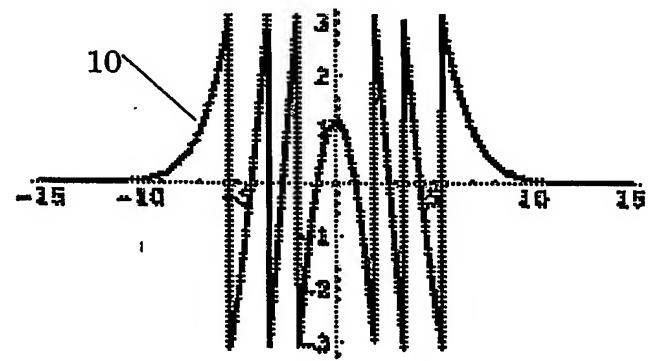
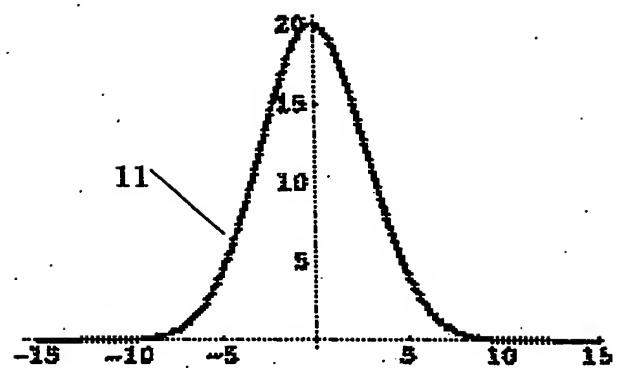


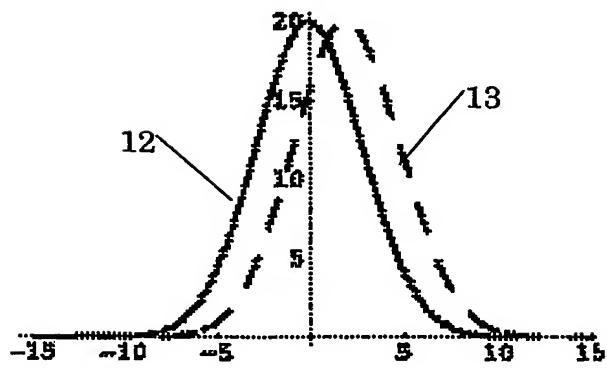
Fig 2



**Fig 3**



**Fig 4**



978

Fig 5

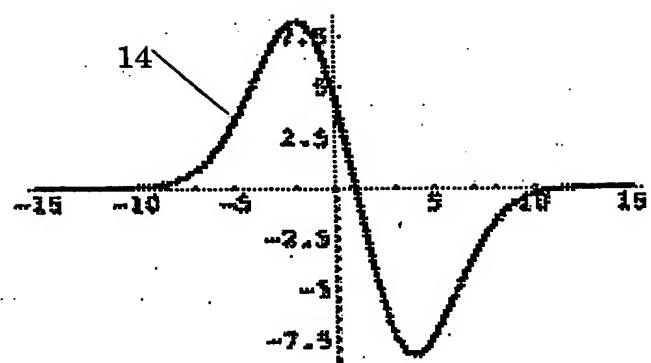
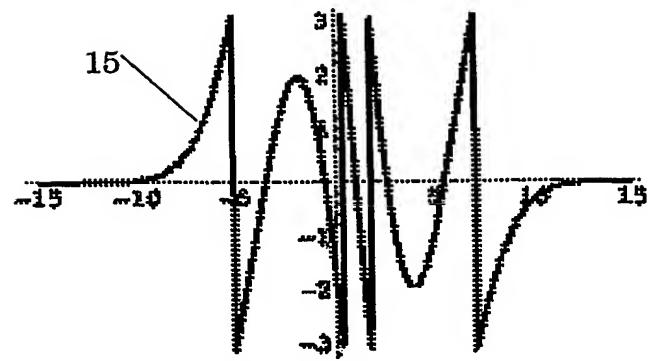
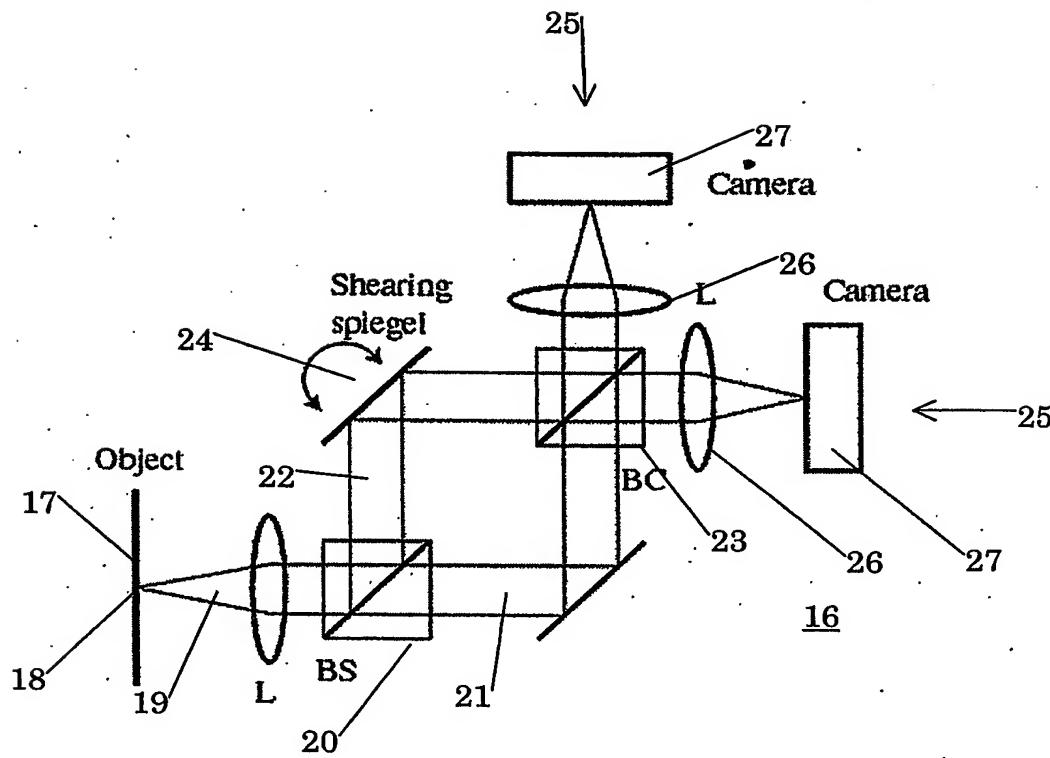


Fig 6



9/26 C

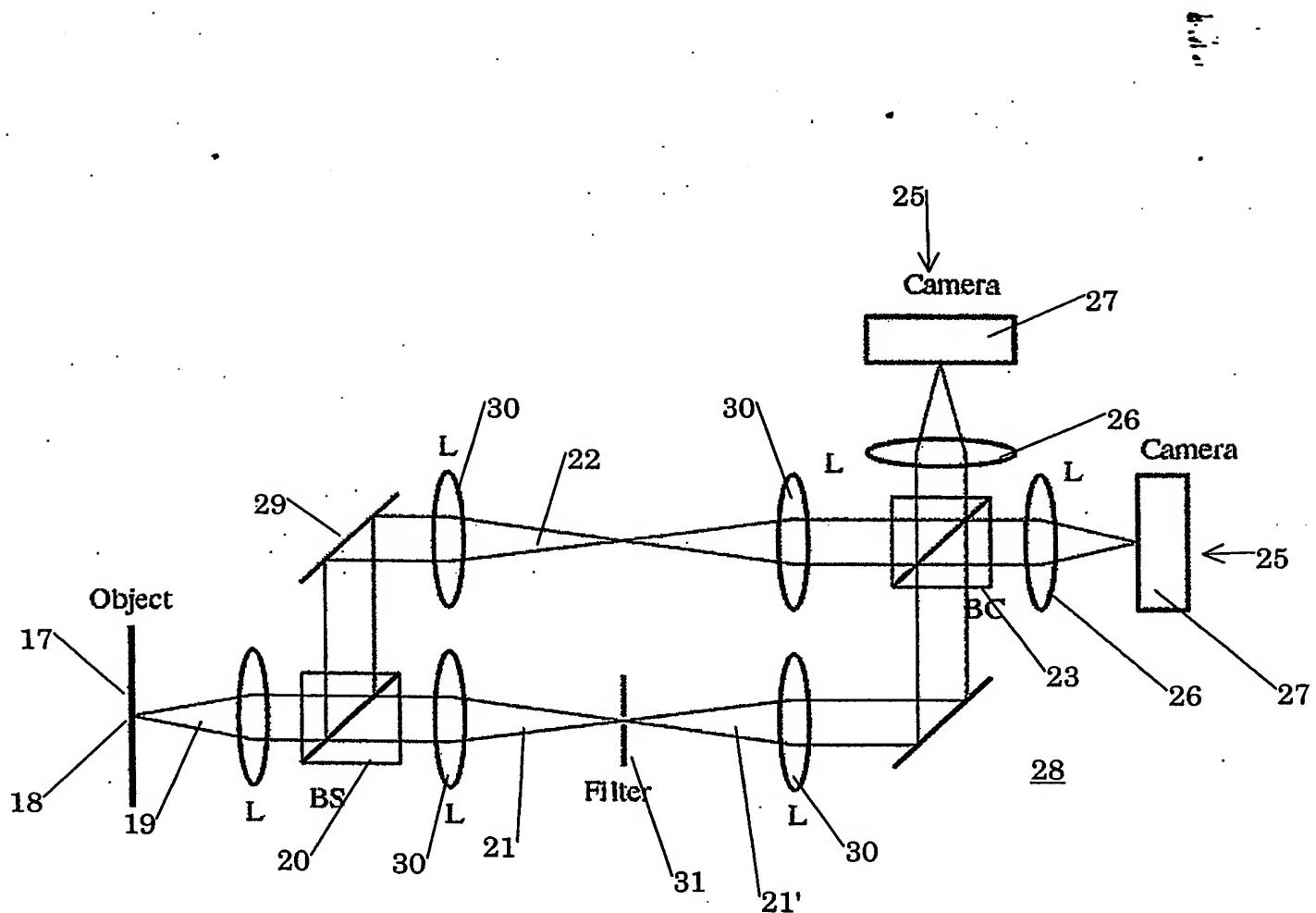
Fig 7



g II ol

1021457

Fig 8



9/11 E